

УДК 521.1; 523.44-3

## МАССА АСТЕРОИДА (7348) 1993 FJ<sub>22</sub>, ОПРЕДЕЛЕННАЯ ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© 2022 В. Б. Кузнецов<sup>1\*</sup>, Ю. А. Чернетенко<sup>1\*\*</sup><sup>1</sup>Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187 Россия

Поступила в редакцию 10 августа 2021 года; после доработки 08 ноября 2021 года; принята к публикации 08 ноября 2021 года

Выполнено определение массы астероида (7348) динамическим методом, основанным на анализе гравитационных возмущений, оказываемых астероидом (7348) на движение астероида (7562) Kagioino–Ока. Выбор указанных астероидов обусловлен тем, что 26 марта 1993 г. они сблизались на расстояние около 1060 км. Диаметр астероида (7348) оценивается в 10 км. Координаты больших планет вычислялись по эфемериде DE440, производился также учет возмущений от карликовых планет и от 340 включенных в модель эфемериды малых тел со значениями масс, принятыми в этой эфемериде. Кроме того, учитывались возмущения от астероидов (656) и (1027), имеющих тесные сближения с (7562) на рассматриваемом интервале времени. При анализе орбиты (7562) были использованы данные 2864 оптических наблюдений в промежутке с 1986 по 2021 гг., представленные в каталоге Международного центра малых планет. К этим наблюдениям были добавлены 90 наблюдений космической обсерватории Gaia (DR2) в 2014–2016 гг. В результате решения нормальной системы относительно поправок орбитальных параметров астероида (7562) Kagioino–Ока и поправки массы (7348) было получено значение массы (7348), равное  $(0.867 \pm 0.243) \times 10^{-14} M_{\odot}$ . На данный момент это самый малый астероид, масса которого определена динамическим методом.

Ключевые слова: небесная механика — малые планеты, астероиды: отдельные: (7348), (7562)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Динамический (астрометрический) метод определения массы астероида основан на использовании гравитационных возмущений, которые более массивное тело оказывает на менее массивное тело или тела (тестовые частицы, тестовые тела). В настоящее время большое число значений масс астероидов получено этим методом, и количество их постоянно возрастает. В этой работе мы приводим результаты определения массы астероида (7348) 1993 FJ<sub>22</sub> по наблюдениям астероида (7562) Kagioino–Ока.

В 2000 г. в рамках программы поиска сближений астероидов было найдено сближение астероидов (7348) и (7562): 26 марта 1993 г. они прошли на расстоянии  $(7.41 \pm 3.05) \times 10^{-6}$  а.е., примерно 1100 км (Kuznetsov 2000), друг от друга. Сближению сопутствовали два фактора:

- 1) оно пришлось на оппозицию, фазовый угол  $\phi = 2^{\circ}2$ ;
- 2) имеется наблюдение, сделанное в Южной европейской обсерватории (La Silla) через несколько часов после сближения, где присутствуют оба

астероида на расстоянии менее 35'' друг от друга (рис. 1).

Интересно отметить, что значение MOID (минимальное расстояние между орбитами, Minimum Orbit Intersection Distance) практически совпадает с минимальным расстоянием между астероидами. Однако вряд ли можно говорить о существовании физической связи этих тел, так как физические и динамические характеристики астероидов различаются. Согласно данным Warner et al. (2018), астероид (7348) имеет диаметр 9.91 км, альbedo 0.08, абсолютную звездную величину 12<sup>m</sup>93–13<sup>m</sup>38. Этот темный астероид С-типа является членом семейства 24 Фемида. Диаметр астероида (7562) равен 6.885 км, альbedo — 0.283, абсолютная звездная величина — 13<sup>m</sup>0.

На эти два необычных астероида также обратили внимание Galád and Gray (2002). По их оценкам, минимальное расстояние между астероидами в 1993 г. составило всего 200 км. Однако авторы посчитали, что недостаточное число наблюдений (7562) делает это сближение непригодным для уточнения массы (7348). Kretlow (2005) оценил массу (7348) в  $(8 \pm 46) \times 10^{-16} M_{\odot}$ .

В настоящее время число наблюдений астероида (7562) значительно возросло по сравнению

\*E-mail: vb.kuznetsov@iaaras.ru

\*\*E-mail: cya@iaaras.ru

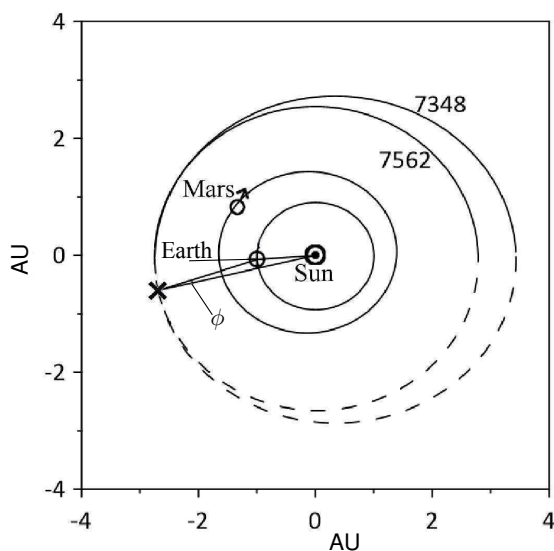


Рис. 1. Сближение астероидов (7348) и (7562) в 1993 г.

с работой Kretlow (2005), выполненной в 2005 г. Кроме того, (7562) наблюдался космическим аппаратом Gaia (Prusti et al. 2016), и результаты наблюдений доступны в рамках DR2<sup>1</sup> (Brown et al. 2018a, Salgado et al. 2017). Поэтому было интересно использовать также и эти данные и оценить их вклад в определяемое значение массы астероида (7348).

## 2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Интегрирование уравнений движения и уравнений в вариациях выполнялось методом Эверхарта (Everhart 1973). В качестве возмущающих составляющих в уравнения движения включены возмущения от всех больших планет, от карликовых планет и от 340 астероидов, включенных в эфемериду DE440 (Park et al. 2021) с соответствующими значениями масс. В уравнениях движения учтены релятивистские возмущения от Солнца.

Информация об используемых наблюдениях приводится в таблице 1. Данные позиционных наблюдений были взяты из каталога Международного центра малых планет<sup>2</sup> (МПЦ) по состоянию на 25.06.2021, а наблюдения Gaia — из каталога (Brown et al. 2018a).

Приведение позиционных наблюдений к системе одного каталога стало возможным в соответствии с рекомендациями работы Chesley et al.

<sup>1</sup><https://gea.esac.esa.int/archive/>

<sup>2</sup>[https://minorplanetcenter.net/db\\_search/show\\_object?utf8=%E2%9C%93&object\\_id=7348](https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=7348),  
[https://minorplanetcenter.net/db\\_search/show\\_object?utf8=%E2%9C%93&object\\_id=7562](https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=7562)

(2010), в которой были вычислены систематические поправки для ряда звездных каталогов относительно каталога 2MASS (Skrutskie et al. 2006). Представленные таблицы поправок уменьшили систематические ошибки наблюдений и улучшили точность вычисляемых орбит. Farnocchia et al. (2015) уточнили таблицы поправок, включив влияние собственных движений звезд. Кроме того, было рассмотрено большее по сравнению с работой Chesley et al. (2010) количество каталогов. В своей работе мы основывались на результатах исследования Farnocchia et al. (2015). Необходимо отметить, что эти поправки возможно учитывать для наблюдений, выполненных после середины 2001 г.

Наблюдательные данные Gaia использовались в процедуре улучшения точности в соответствии с описанием каталога наблюдений и рекомендациями работы Spoto et al. (2018b).

## 3. МИНИМАЛЬНОЕ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ АСТЕРОИДАМИ

При уточнении орбитальных элементов рассматриваемых астероидов была принята следующая схема назначения весов позиционным наблюдениям: данным 1901–1950 гг. назначался вес 1/9, наблюдениям 1951–1995 гг. — вес 1/4, наблюдениям с 1996 г. — вес 1. Результаты уточнения орбитальных параметров приводятся в двух последних колонках таблицы 1. На основании этих уточненных элементов были получены минимальные расстояния между рассматриваемыми астероидами и другими астероидами, сближающимися с ними (таблица 2). В этот список не вошли астероиды из числа 340, включенных в эфемериду DE440. На основании данных таблицы 2 в уравнения движения астероида (7348) были включены также возмущения от астероидов (656) и (1027) с массами  $8.66 \times 10^{-14} M_{\odot}$  и  $4.06 \times 10^{-14} M_{\odot}$  соответственно. Вычисления показали, что их влияние на определяемое значение массы (7348) незначительно.

Минимальное расстояние между астероидами (7348) и (7562) после уточнения их орбит составило  $6.72 \times 10^{-6}$  а.е., примерно 1060 км.

Рисунок 2 иллюстрирует изменение расстояния между астероидами (7348) и (7562). Так как эти астероиды находятся в соизмеримости средних движений 5:4, сближения повторяются. Сближение в 1993 г. является самым тесным на исследуемом интервале времени.

## 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ АСТЕРОИДА (7348)

Отдельного рассмотрения требует вопрос о совместном использовании позиционных наблюдений

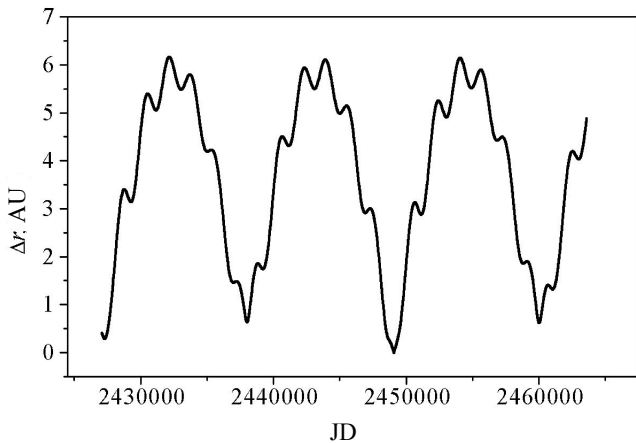
**Таблица 1.** Информация о наблюдениях

| Астероид               | Интервал наблюдений, UT | Число наблюдений | Число оппозиций | $O - C$ , угл. сек. | $CKO$ , угл. сек. |
|------------------------|-------------------------|------------------|-----------------|---------------------|-------------------|
| Позиционные наблюдения |                         |                  |                 |                     |                   |
| 7348                   | 1933 03 23 – 2021 05 13 | 2466             | 27              | 0.3201              | 0.3083            |
| 7562                   | 1986 11 30 – 2021 05 31 | 3033             | 26              | 0.2681              | 0.2068            |
| Наблюдения Gaia DR2    |                         |                  |                 |                     |                   |
| 7348                   | 2014 12 28 – 2016 05 05 | 77               | 3               | 0.1045              | 0.1045            |
| 7562                   | 2014 10 17 – 2016 05 17 | 90               | 3               | 0.0934              | 0.0934            |

**Таблица 2.** Тесные сближения астероидов (7348) и (7562) с другими астероидами на рассматриваемом интервале времени

| (7348)   |          |               |                              | (7562)   |          |               |                              |
|----------|----------|---------------|------------------------------|----------|----------|---------------|------------------------------|
| Астероид | $D$ , км | Дата          | Минимальное расстояние, а.е. | Астероид | $D$ , км | Дата          | Минимальное расстояние, а.е. |
| 656      | 62.604   | 1993 02 12.97 | 0.01020                      | 656      | 62.604   | 1993 03 15.32 | 0.01423                      |
| 1027     | 31.225   | 1991 02 21.21 | 0.09823                      | 16616    | 6.2*     | 1990 10 24.40 | 0.00022                      |
| 16877    | 9.224    | 2004 11 22.23 | 0.04916                      | 274668   | 3.712    | 1991 12 29.48 | 0.00090                      |
| 55860    | 5.571    | 2014 02 20.68 | 0.03984                      |          |          |               |                              |
| 85008    | 5.515    | 1968 07 29.87 | 0.00314                      |          |          |               |                              |
| 198316   | 1.4*     | 1998 07 1.34  | 0.00045                      |          |          |               |                              |

Значения диаметров, за исключением отмеченных знаком \*, приводятся по работе Warner et al. (2018).



**Рис. 2.** Расстояние,  $\Delta r$  между астероидами (7348) и (7562).  $\Delta r = 0.00000672$  а.е. 1993 03 25.99 (JD = 2449072.49).

и наблюдений Gaia в процессе уточнения орбитальных параметров. Как видно из таблицы 1, эти две группы существенно различаются как числом

наблюдений, так и интервалами. Если исходить только из оценок точности Spoto et al. (2018b), можно сказать, что наблюдения Gaia примерно в 100 раз точнее, чем позиционные наблюдения, и в соответствии с этой оценкой им должен быть назначен вес при решении системы условных уравнений. С практической точки зрения наиболее удобным оказалось использование для каждого наблюдения весовой матрицы  $(2 \times 2)$   $\mathbf{W}$ , которая является обратной к матрице ковариации  $\mathbf{G}$  и приводится для каждого наблюдения Gaia в каталоге наблюдений (Brown et al. 2018a). Результаты уточнения орбитальных параметров с отдельным использованием этих групп наблюдений показаны в двух последних столбцах таблицы 1. Результаты определения массы астероида (7348) приводятся в таблице 3. Видно, что оба варианта дают близкие результаты.

Интересно отметить, что в работе Spoto et al. (2018b) приводятся результаты использования наблюдательных данных Gaia совместно с позиционными (с 1955 г.) и с семью радарными на-

Таблица 3. Масса астероида (7348) по наблюдениям астероида (7562)

| Используемые<br>данные                          | $M_{(7348)}$<br>(в $10^{-14} M_{\odot}$ ) | $M_{(7348)}/$<br>$\sigma(M_{(7348)})$ | Орбита (7562)       |                   |
|---|---|---------------------------------------|---------------------|-------------------|
|   |   |                                       | $O - C$ , угл. сек. | $CKO$ , угл. сек. |
| Позиционные наблюдения МПЦ                      | $0.864 \pm 0.245$                         | 3.527                                 | 0.2671              | 0.2603            |
| Позиционные наблюдения МПЦ<br>и наблюдения Gaia | $0.867 \pm 0.243$                         | 3.562                                 | 0.2634              | 0.2549            |

блюдениями астероида (2062) Aten для уточнения параметра эффекта Ярковского. При этом позиционные наблюдения и наблюдения Gaia принимаются равноточными. Авторы отмечают, однако, что эти результаты являются предварительными и полагают, что необходимо уменьшение ошибок звездных каталогов в позиционных наблюдениях и разработка лучшей модели отбраковки среди них ошибочных наблюдений для более корректного их использования совместно с наблюдениями Gaia.

### 5. ОБСУЖДЕНИЕ

Динамическим методом по наблюдениям возмущаемого астероида (7562) получена статистически значимая оценка массы астероида (7348), равная  $(0.867 \pm 0.243) \times 10^{-14} M_{\odot}$ , самая малая из всех определенных до сих пор таким способом. Это определение оказалось возможным благодаря очень тесному сближению астероидов (7348) и (7562) в 1993 г., при котором минимальное расстояние между телами составило приблизительно 1060 км. Кроме того, имеется большое количество наблюдений возмущаемого астероида (7562) по обе стороны от сближения. Вычисления выполнены с использованием позиционных наблюдений и наблюдений Gaia, представленных в каталоге Gaia DR2 (Brown et al. 2018a). Включение в рассмотрение этих последних не привело к существенному повышению точности определяемого значения массы (7348). Частично это связано с их относительно малым количеством и тем фактом, что они находятся по одну сторону от тесного сближения.

Также была предпринята попытка определения массы астероида (7562) по наблюдениям астероида (7348). Ошибка массы (7562) составила  $\pm 0.116 \times 10^{-14} M_{\odot}$ , однако само значение массы оказалось нереальным.

### БЛАГОДАРНОСТИ

В настоящей работе были использованы данные миссии Gaia ESA (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), обработанные DPAC (<https://www>.

[cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium](https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium)). Финансирование DPAC осуществлялось национальными учреждениями, в частности, учреждениями, участвующими в Многостороннем соглашении Gaia. В этом исследовании использовались данные и/или сервисы, предоставленные Центром малых планет Международного астрономического союза.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A1 (2018a).
2. S. R. Chesley, J. Baer, and D. G. Monet, *Icarus* **210** (1), 158 (2010).
3. E. Everhart, *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **5**, 389 (1973).
4. D. Farnocchia, S. R. Chesley, A. B. Chamberlin, and D. J. Tholen, *Icarus* **245**, 94 (2015).
5. A. Galád and B. Gray, *Astron. and Astrophys.* **391**, 1115 (2002).
6. V. B. Kuznetsov, in *Tez. dokl. conf. on Astrometriya, geodinamika i nebesyaya mehanika na poroge XXI veka, St. Petersburg, 2000*, pp. 302–303 (Inst. Applied Astronomy RAS, St. Petersburg, 2000) [in Russian].
7. M. Kretlow, *Mass Determination of Asteroids* (2005), <https://astro.kretlow.de/userfiles/downloads/MKR-KPT2005-MassDetermination.pdf>.
8. R. S. Park, W. M. Folkner, J. G. Williams, and D. H. Boggs, *Astron. J.* **161** (3), 105 (2021).
9. T. Prusti et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **595**, id. A1 (2016).
10. J. Salgado, J. González-Núñez, R. Gutiérrez-Sánchez, et al., *Astronomy and Computing* **21**, 22 (2017).
11. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al., *Astron. J.* **131** (2), 1163 (2006).
12. F. Spoto et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A13 (2018b).
13. B. Warner, P. Pravec, and A. P. Harris, *NASA Planetary Data System* (2018).

**Mass of the Asteroid (7348) 1993 FJ<sub>22</sub> as Determined by the Dynamic Method****V. B. Kuznetsov<sup>1</sup> and Yu. A. Chernetenko<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Institute of Applied Astronomy, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 191187 Russia

The mass of the asteroid (7348) is determined by the dynamic method based on the analysis of gravitational perturbations in the motion of the asteroid (7562) Kagiroido—Oka caused by asteroid (7348). The choice of these asteroids is due to the fact that on March 26, 1993, they approached each other at a distance of about 1060 km. The diameter of the asteroid (7348) is estimated at 10 km. The coordinates of the major planets were calculated according to the DE440 ephemeris. Perturbations from dwarf planets and 340 minor bodies included in the ephemeris model were also taken into account with the masses adopted in this ephemeris. Additionally, perturbations from asteroids (656) and (1027) that had close encounters with (7562) during the considered time interval were also taken into account. In the analysis of the orbit of (7562), 2864 Minor Planet Center catalog optical observations from the 1986–2021 interval were used. These observations were supplemented with 90 observations from Gaia DR2 space observatory obtained in 2014–2016. As a result of solving the normal system with respect to the orbital parameter corrections for asteroid (7562) Kagiroido—Oka and the mass correction of (7348), the mass of (7348) was derived as  $(0.867 \pm 0.243) 10^{-14} M_{\odot}$ . Currently, it is the smallest asteroid the mass of which was determined by the dynamic method.

Keywords: *celestial mechanics—minor planets, asteroids: individual: (7348), (7562)*